

На правах рукописи



ШИМОВ Георгий Викторович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕПЛООБМЕННЫХ
ТРУБ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ**

Специальность 05. 16. 05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, ст. науч. сотр., Буркин Сергей Павлович

Научный консультант:

Кандидат технических наук, Серебряков Андрей Васильевич

Официальные оппоненты:

Раскатов Евгений Юрьевич, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры металлургических и роторных машин

Смирнов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, ст. науч. сотр. лаборатории механики деформаций

Ведущая организация:

ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности»

Защита состоится «27» декабря 2013 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28, в ауд. Мт-329.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан «25» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Мальцева Людмила
Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из основных требований Федеральной целевой программы развития атомного энергопромышленного комплекса России является обеспечение гарантированной безопасности АЭС и повышения срока службы энергоблоков с 30 до 60 лет и более. Достижение поставленных целей требует решения важных технических задач, связанных с повышением надежности и увеличением ресурса работы оборудования АЭС.

В рамках Программы развития «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007-2010 годы и перспективу до 2015 года» Россия планирует увеличить долю атомной энергетики в народнохозяйственном комплексе государства почти в 2,5 раза за счет ввода до 2030 года почти 40 новых блоков. До 2020 года в Российской Федерации построят четыре новые атомные электростанции.

Повышение требований к проектным срокам службы энергоблоков определяет возросшие требования к надежности и качеству оборудования АЭС, важнейшим элементом которого является парогенератор (ПГ). Одним из основных факторов, определяющих техническое состояние и срок службы парогенератора АЭС, является состояние теплообменных труб (ТОТ). Выход теплообменных труб из строя в процессе эксплуатации приводит к длительной остановке всего агрегата и к значительным экономическим убыткам.

В процессе эксплуатации парогенератора имеет место зарождение и последующий рост коррозионных дефектов ТОТ, основными видами которых являются коррозионное растрескивание (КР), питтинговая и межкристаллитная коррозия (МКК). Развитие коррозионных трещин ТОТ происходит при совместном действии коррозионной среды, а также рабочих и технологических остаточных напряжений в металле. Поэтому снижение технологических растягивающих остаточных напряжений в теплообменных трубах является актуальной проблемой.

Работа выполнена в рамках исследований, включенных в следующие научные программы и контракты:

– программа УрФУ «Целевая аспирантура Уральского федерального университета» (по договору № 27 от 01.10.2012 г.);

– НИР № 2368/011 от 20 января 2011 г. «Выполнение комплекса работ по созданию научно-технических предпосылок и технической базы для разработки технологии изготовления теплообменных труб парогенераторов проекта АЭС-2006 из стали 08X18H10T с повышенным уровнем коррозионной стойкости и нормированием уровня остаточных напряжений»;

– НИР № H97742B012/12 от 22 ноября 2011 г. «Развитие физики и механики обработки металлов давлением с целью разработки инновационных процессов и технологий производства металлургической продукции транспортного назначения, для нефтедобычи и энергомашиностроения» по этапу 2 «Исследование уровня остаточных напряжений и коррозионной стойкости труб и проволоки из аустенитных нержавеющей сталей»;

– программа поддержки молодых ученых УрФУ в рамках реализации программы развития УрФУ на 2010 – 2020 годы (по договорам № 1.2.1.5./45 от 01.07.2012 г. и № 1.2.1.5./70 от 27.05.2013 г.).

Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы является создание технологии финишной обработки теплообменных труб, обеспечивающей снижение в них растягивающих или формирование сжимающих остаточных напряжений. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать литературные данные о дефектах, возникающих при эксплуатации теплообменных труб парогенераторов, и определить направление совершенствования технологии их производства;
2. Предложить способ финишной правки труб с одновременным нагревом, с целью уменьшения в них растягивающих или формирования сжимающих остаточных напряжений;

3. Разработать конструкцию установки для правки труб растяжением с одновременным нагревом;
4. Подготовить научно-обоснованные рекомендации по промышленному использованию предложенного способа;
5. Разработать методику, позволяющую простыми аппаратными средствами и не сложными расчетными операциями определять остаточные напряжения в трубах.

Научная новизна полученных результатов

В работе получены и выносятся на защиту следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

- алгоритм расчета распределения остаточных напряжений по стенке трубы на основе «энергетического подхода»;
- способ финишной правки труб с одновременным нагревом;
- результаты исследования закономерностей формирования остаточных напряжений при электроконтактном нагреве труб с одновременным растяжением;
- результаты сравнительного анализа кривизны труб а также остаточных напряжений в трубах, изготовленных по применяемой и предложенной технологиям.

Теоретическая значимость работы заключается в результатах экспериментальных исследований остаточных напряжений в трубах, которые расширяют знания о влиянии параметров нагрева и растяжения на остаточные напряжения в стенке труб. Предложена и опробована экспериментально-аналитическая методика расчета распределения остаточных напряжений в стенке трубы.

Практическую значимость работы представляют следующие результаты диссертации:

- рекомендации по применению способа правки труб растяжением с одновременным нагревом.
- апробация способа правки труб растяжением с одновременным нагревом;

- сравнительный анализ качества труб, изготовленных применяемым и предлагаемым способами;
- конструкция промышленной установки правки труб растяжением с одновременным нагревом;
- техническое задание на проектирование промышленной установки правки труб растяжением с одновременным нагревом.
- экспериментально-аналитическая методика определения остаточных напряжений в трубах;
- конструкция установки для определения остаточных напряжений в трубах методом электролитического травления;
- результаты измерений по новой методике остаточных напряжений в трубах, изготовленных по применяемой технологии.

Достоверность полученных научных результатов и выводов диссертации обоснована использованием статистических методов обработки опытных данных, применением основных положений механики деформируемого тела, теорий пластичности и упругости. Достоверность полученных результатов подтверждается схожестью расчетных данных с результатами проведенных промышленных и лабораторных экспериментов, а также их соответствием данным опубликованным в работах других авторов. Научные положения и практические выводы работы подтверждены в процессе апробации нового способа получения труб с низким уровнем остаточных напряжений.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- XVIII международная промышленная выставка «Металл-ЭКСПО-2012» (Москва, 2012);
- XIV международной научной конференции «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering» (Польша, Ченстохова, 2013);

- VI международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» (Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф.Головина, Екатеринбург, 2013);
- VII международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», посвященная памяти чл.-корр. РАН, почетного доктора УрФУ В.Л. Колмогорова (Екатеринбург, 2013);
- XII международная научно-техническая уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых (Екатеринбург, 2011);
- Региональная научно-практическая конференция «Молодежь и наука» (Нижний Тагил, 2011);
- I Международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии». (Екатеринбург, 2012).

Публикации

Результаты диссертационной работы отражены в 6 печатных трудах и тезисах докладов, 2 из них – из перечня изданий, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из 4 глав, 3 приложений и списка литературных источников в составе 110 наименований, содержит 178 страниц машинописного текста, включая 48 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы научная и практическая значимость результатов работы, указана структура диссертации, дано краткое изложение работы по главам.

В первой главе представлен обзор литературных данных о дефектах, возникающих при эксплуатации теплообменных труб парогенераторов, рассмотрены причины появления и развития дефектов теплообменных труб. Одним из основных дефектов является коррозионное растрескивание под напряжением, которое

развивается под действием растягивающих напряжений в трубах. Это приводит к раскрытию коррозионных трещин, что влечет за собой разгерметизацию контура и выход теплоносителя. Показано, что коррозионные повреждения теплообменных труб представляют собой зарождение и рост трещин под действием растягивающих рабочих и остаточных напряжений.

Также в первой главе проведен обзор существующих технологий производства теплообменных труб из нержавеющей сталей в России и зарубежом. В настоящее время технология производства теплообменных труб парогенераторов включает в себя холодную прокатку, термическую обработку в газовых или электрических печах и последующую правку труб на правильном стане. Необходимость правки вызвана большой кривизной труб после термической обработки. При правке появляются растягивающие остаточные напряжения, а также выделяется мартенсит деформации, что в итоге снижает стойкость теплообменных труб к коррозионному растрескиванию. Поэтому снижение растягивающих остаточных напряжений в трубах является актуальной задачей.

В первой главе представлен также обзор известных методов определения и снижения остаточных напряжений в металлопродукции. Рассмотрены основные причины появления и механизмы формирования остаточных напряжений. На основе литературного обзора выполнен анализ современного состояния и актуальности вопроса определения технологических остаточных напряжений в трубах. Впервые на проявление остаточных напряжений в деформированном металле обратил внимание И.А. Биргер в 1836 году. В России первым занялся исследованием остаточных напряжений в чугунах и сталях Н.В. Калакуцкий, который еще в позапрошлом веке отметил, что остаточные напряжения внешне проявляют себя через изменение геометрических размеров частей изделия при его разделении на части. Первую классификацию остаточных напряжений предложили Е. Орован и К.В. Мак-Грегор. Исследованию остаточных напряжений посвящены работы Н.Н. Давиденкова, Б.М. Ровинского, А.А. Ильюшина, В.Л. Колмогорова, И.А. Соколова, В.И. Уральского, А.А. Поздеева, Ю.И. Няшина, П.В. Трусова, Г.Л. Колмогорова, А.А. Богатова и других ученых. При изучении остаточных напряжений

главной проблемой можно считать выбор наиболее точных методов их определения. Известно множество экспериментальных и теоретических методов определения остаточных напряжений, но все они имеют ряд недостатков.

В последнем разделе первой главы сформулированы цели и основные задачи исследования.

Во второй главе приведено обоснование выбора способа нагрева теплообменных труб с целью снижения в них уровня остаточных напряжений.

Предложен способ электроконтактного нагрева и последующего охлаждения труб с одновременным их растяжением. Преимуществом данного способа является то, что труба одновременно подвергается нагреву и правке растяжением. Это позволяет исключить операцию валковой правки.

Представлены результаты апробации предложенного способа в производственных условиях. Описана конструкция и принцип работы опытной установки (рисунок 1). Конструкция установки обеспечивает возможность регулирования усилия натяжения трубы в процессе нагрева и охлаждения в зависимости от температуры.

На опытной установке в условиях ОАО «ПНТЗ» проведен эксперимент по обработке теплообменных труб размером $16 \times 1,5$ мм из стали 08X18H10T (ТУ 14-ЗР-197-2001) предлагаемым способом. Трубы закреплялись в зажимных устройствах (подвижном и неподвижном) и нагревались в натянутом состоянии до нужной температуры. Исследование режимов обработки труб на опытной установке, для получения необходимого уровня механических свойств, величины зерна и стойкости труб к МКК, проводилась при различной величине силы тока, при этом определялось время, при котором труба нагревалась до максимальной температуры и время выдержки. Охлаждение труб проводилось на воздухе. Трубы в процессе нагрева и охлаждения поддерживались в натянутом состоянии с помощью подвижного зажимного устройства. В период нагрева, подвижный контакт отодвигался с помощью специального приспособления, а в период охлаждения, постепенно возвращался к исходное положение. В начале и конце нагрева задавалась величина осевого усилия. Непрямолинейность на один метр длины обработанных

труб составляла 0,7...2,6 мм. Для сравнения, непрямолинейность труб, после печного нагрева, на отдельных участках достигает 10...15 мм.

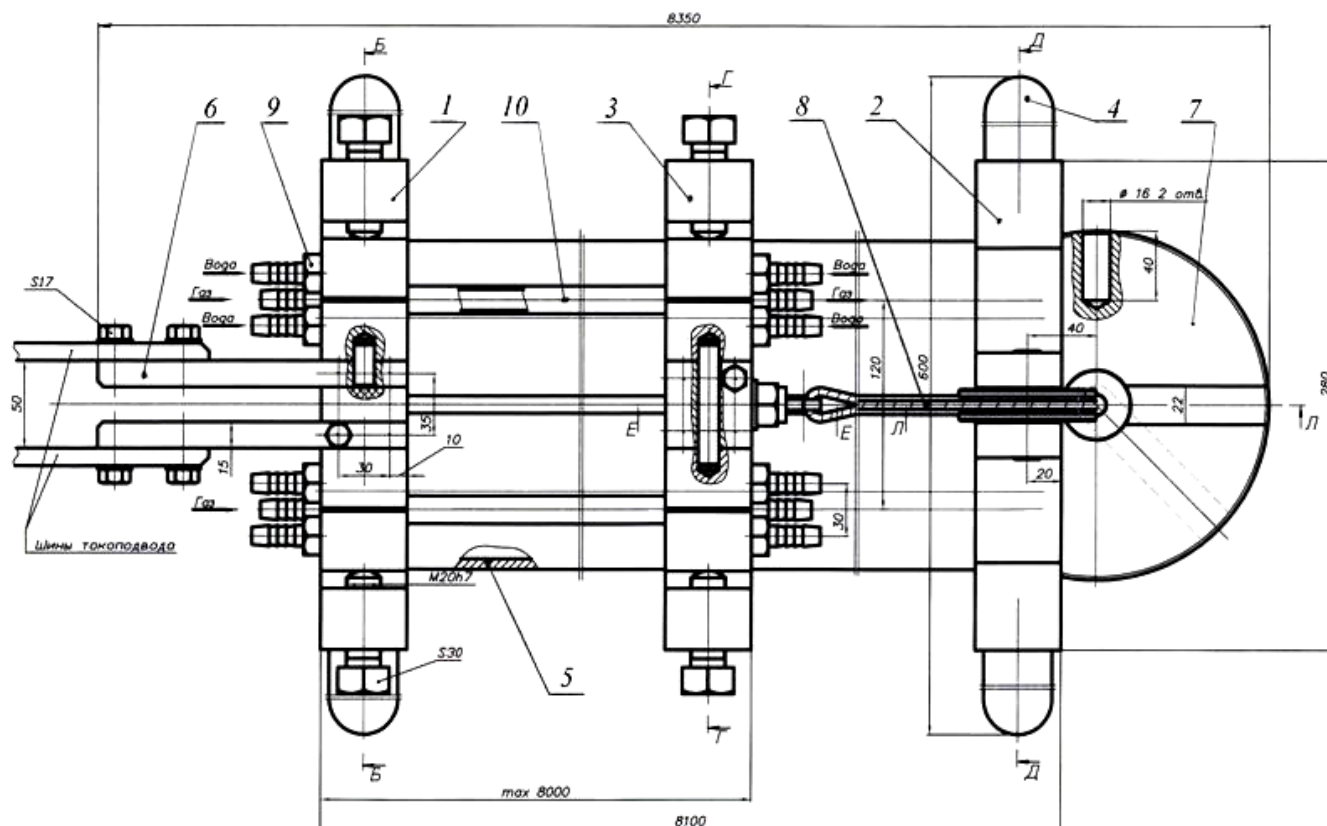


Рисунок 1 — Чертеж общего вида (вид сверху) опытной установки электроконтактного нагрева труб: 1 – передняя поперечина; 2 – задняя поперечина; 3 – подвижная поперечина; 4 – опора; 5 – станина; 6 – шина токоподвода; 7 – пневматическое устройство натяжения; 8 – канат; 9 – штуцер системы охлаждения; 10 – нагреваемая труба

Механические свойства, стойкость против МКК и микроструктура обработанных труб проверялись на соответствие требованиям ТУ 14-ЗР-197-2001. Результаты исследования микроструктуры труб после обработки по различным режимам представлены на рисунках 2-9. В результате были выявлены режимы нагрева и охлаждения, обеспечивающие наилучшее качество труб: сила тока 550÷600 А, напряжение 75÷77 В, общее время обработки 3 минуты.

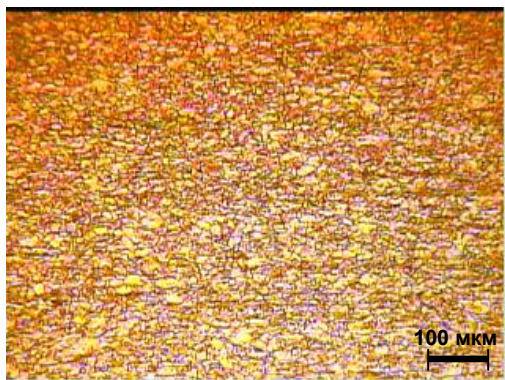


Рисунок 2 – Микроструктура металла труб после обработки: сила тока 420А, напряжение 58В, величина зерна – участки 10, 9 и деформированные нерекристаллизованные зерна; механические свойства при 20⁰С:
 $\sigma_B = 679$ МПа, $\sigma_{02} = 434$ МПа,
 $\delta = 37,2\%$;
 предел текучести при 350⁰С:
 $\sigma_{02} = 368$ МПа

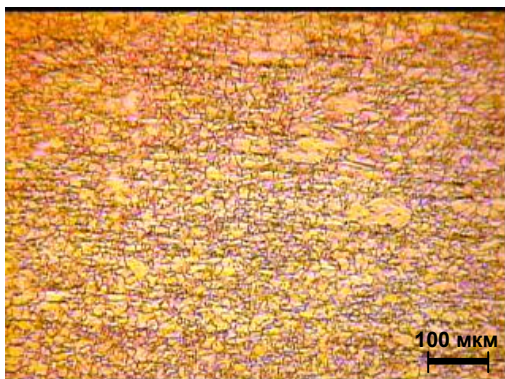


Рисунок 3 – Микроструктура металла труб после обработки: сила тока 430А, напряжение 60В, величина зерна – участки 10, 9 и деформированные нерекристаллизованные зерна; механические свойства при 20⁰С:
 $\sigma_B = 703$ МПа, $\sigma_{02} = 472$ МПа,
 $\delta = 32,4\%$;
 предел текучести при 350⁰С:
 $\sigma_{02} = 296$ МПа

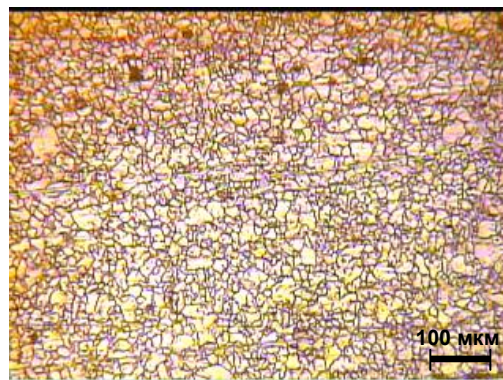


Рисунок 4 – Микроструктура металла труб после обработки: сила тока 500А, напряжение 70В, величина зерна 10, 8, (7) и меньше; механические свойства при 20⁰С:
 $\sigma_B = 603$ МПа, $\sigma_{02} = 282$ МПа,
 $\delta = 51,8\%$;
 предел текучести при 350⁰С:
 $\sigma_{02} = 204$ МПа

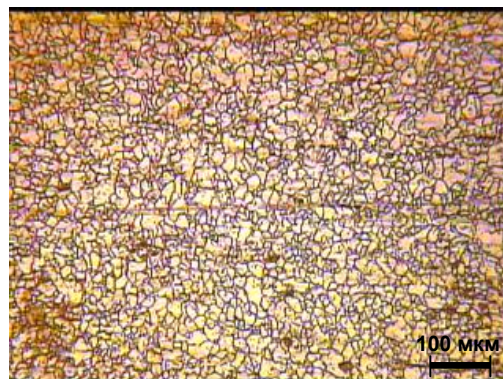


Рисунок 5 – Микроструктура металла труб после обработки: сила тока 550А, напряжение 75В, величина зерна 8 и 10; механические свойства при 20⁰С:
 $\sigma_B = 597$ МПа, $\sigma_{02} = 274,4$ МПа,
 $\delta = 53\%$;
 предел текучести при 350⁰С:
 $\sigma_{02} = 191$ МПа

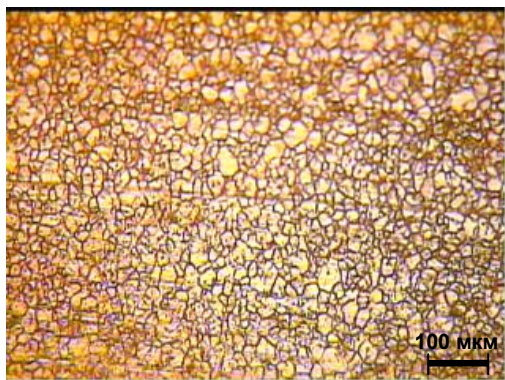


Рисунок 6 – Микроструктура металла труб после обработки:
сила тока 600А, напряжение 77В,
величина зерна 9 и 10;
механические свойства при 20⁰С:
 $\sigma_B = 604$ МПа, $\sigma_{02} = 243$ МПа,
 $\delta = 53,9\%$;
предел текучести при 350⁰С:
 $\sigma_{02} = 194$ МПа

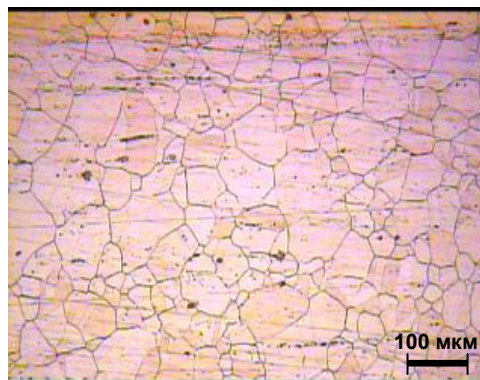


Рисунок 8 – Микроструктура металла труб после обработки:
сила тока 760А, напряжение 105В,
величина зерна 5, 6, (7);
механические свойства при 20⁰С:
 $\sigma_B = 580$ МПа, $\sigma_{02} = 220$ МПа,
 $\delta = 60\%$;
предел текучести при 350⁰С:
 $\sigma_{02} = 181$ МПа



Рисунок 7 – Микроструктура металла труб после печного нагрева: величина зерна 9 и 10;
механические свойства при 20⁰С:
 $\sigma_B = 637$ МПа, $\sigma_{02} = 358$ МПа,
 $\delta = 51,5\%$;
предел текучести при 350⁰С:
 $\sigma_{02} = 304$ МПа

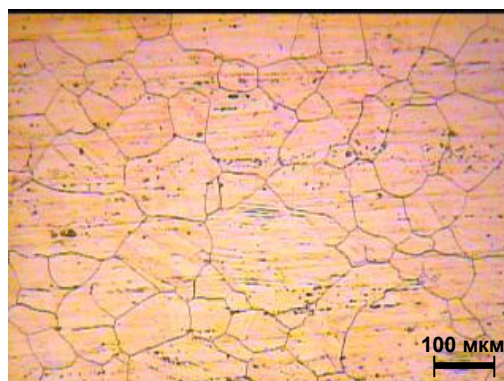


Рисунок 9 – Микроструктура металла труб после обработки:
сила тока 800А, напряжение 105В,
величина зерна 5, 6, (4);
механические свойства при 20⁰С:
 $\sigma_B = 553$ МПа, $\sigma_{02} = 206$ МПа,
 $\delta = 64\%$;
предел текучести при 350⁰С:
 $\sigma_{02} = 144$ МПа

Дополнительно в рамках данной работы проведены испытания труб на остаточные напряжения в соответствии с РИ 25-56-2006 «Порядок определения остаточных напряжений» и кривизну. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уровень тангенциальных остаточных напряжений и кривизна труб 16×1,5 мм из стали 08X18H10T, обработанных по предлагаемой и применяемой технологиям

Электроконтактный нагрев			Печной нагрев		
№ обр.	$\sigma_{\text{фф}}$, МПа	Кривизна, мм/п.м.	№ обр.	$\sigma_{\text{фф}}$, МПа	Кривизна, мм/п.м.
2	6,28	1,1	1	86,4	10,4
3	29,7	1,4	2	144,6	17,7
4	3,13	1,0	3	61,6	13,2
5	0,00	0,7	4	93,1	13,2
6	33,3	2,8	5	108,5	14,3
7	0,00	0,9	6	108,1	12,9
8	0,00	1,2	7	92,5	19,0
Среднее	1,35	1,3	Среднее	99,3	14,4

Таким образом, способ правки труб растяжением с одновременным нагревом обеспечивает получение механических свойств, величины зерна металла труб, микроструктуру и стойкость против МКК в соответствии с требованиями ТУ 14-3Р-197-2001.

Кривизна и уровень растягивающих остаточных напряжений в трубах, обработанных предложенным способом, на порядок величины меньше, чем в трубах, после печного нагрева.

Преимуществами электроконтактного нагрева являются высокая скорость и равномерность нагрева, возможность регулирования скорости нагрева, а также низкое энергопотребление и высокая производительность при малых габаритах.

Для исследования влияния параметров обработки труб сконструирована и изготовлена лабораторная установка правки труб растяжением с одновременным нагревом. Конструкция установки показана на рисунке 10. Исследования проведены на образцах труб размером 20×1,5 мм из стали 08X18H10T после прокатки на стане ХПТР. Исследовалось охлаждение наружной поверхности труб на воздухе и в воде, охлаждение внутренней поверхности водой. В обработанных образцах труб контролировались: остаточные напряжения, величина зерна, твердость и стойкость против ММК. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

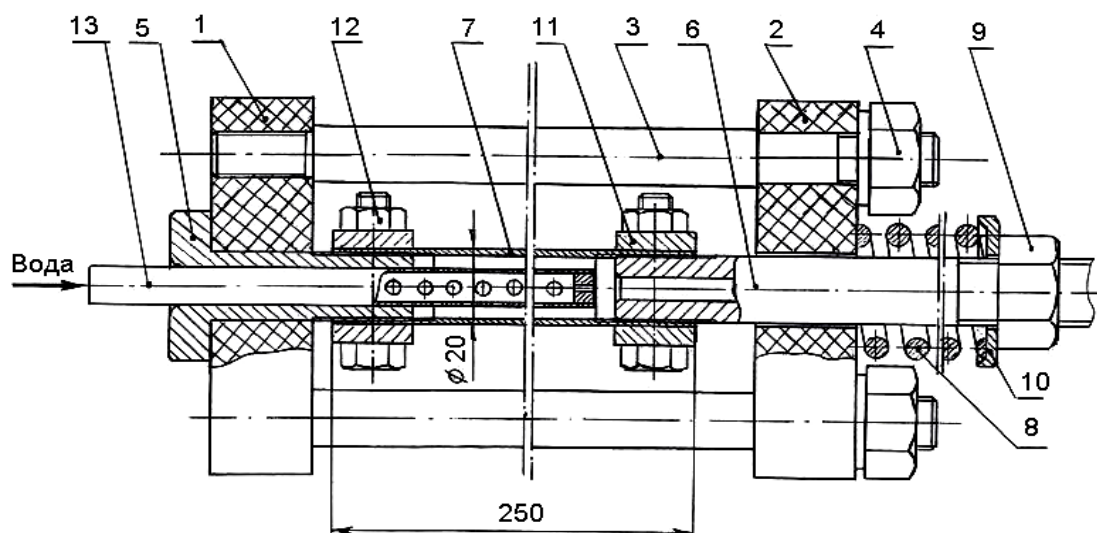


Рисунок 10 — Конструктивная схема лабораторной установки: 1,2 – поперечины; 3 – стяжные шпильки; 4 – гайка; 5 – неподвижный захват; 6 – подвижный захват; 7 – образец трубы; 8 – пружина; 9 – гайка; 10 – шайба; 11 – контакт; 12 – стяжной болт; 13 – перфорированная трубка

Таблица 2

Результаты лабораторных экспериментов по отработке режимов правки труб
20x1,5 мм из стали 08X18H10T растяжением с одновременным нагревом

№	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{с}$	Охлаждение	$q_0, \text{МПа}$	$q_1, \text{МПа}$	$I_1, \text{А}$	Зерно, балл	Стойкость против МКК	HRF	$\sigma_{\text{фф}}, \text{МПа}$
1	950	60	вх	—	—	0	9,8	мкк до 0,035 мм	74,0	-16.2
2	1100	37	вх	—	—	0	10	стойк	75,0	-13.5
3	1000	30	вх	—	—	0	10,9	мкк до 0,025 мм	72,0	-17.9
4	1050	35	вх	34,3	25,0	0	10,9	стойк	75,0	-82.5
5	950	30	вх	34,3	28,0	0	9,8	стойк	74,0	-54.2
6	1000	30	вх	34,3	25,5	0	10,9	стойк	75,0	-63.4
7	1050	34	вх	34,3	24,5	0	10	стойк	72,0	-96.2
8	1000	28	нр	—	—	0	9,8	мкк до 0,035 мм	73,5	-12.0
9	1000	35	нр	34,3	25,5	0	9(8)	стойк	71,5	0,0
10	1000	56	вн	—	—	0	9,10,8	стойк	70,5	26.2
11	1000	40	вн	25,8	18,4	0	8,7,6	мкк до 0,06 мм	76,0	98.0
12	1000	35	вн	—	—	45	10	стойк	76,5	82.2
13	1000	30	вн	—	—	45	10	мкк до 0,035 мм	72,5	56.4
14	1030	40	нр	16,6	9,8	40	10,9	стойк	73,5	-103.1
15	1000	35	нр	16,6	9,8	40	9,10,8	стойк	70,0	-110.4
16	1050	45	вн	16,6	9,0	40	7,6	мкк до 0,06 мм	70,0	23.9
17	1000	30	вн	16,6	9,8	40	10,9	стойк	75,0	106.4
18	1050	35	вн	16,6	9,0	40	10,9	мкк до 0,035 мм	74,5	27.4

Примечание: q_0 – напряжение натяжения до нагрева; q_1 – напряжение натяжения в конце нагрева; вн – внутреннее охлаждение водой; нр – наружное охлаждение водой; vx – охлаждение на воздухе; I_1 – сила тока во время охлаждения.

Как видно из таблицы 2, наружное охлаждение на воздухе и в воде обеспечивает формирование сжимающих остаточных напряжений в трубах, удовлетворительную стойкость против МКК, а также балл зерна не ниже 8.

Лабораторные исследования режимов нагрева и растяжения труб показали, что нагрев труб с одновременным натяжением и последующее наружное охлаждение на воздухе или в воде обеспечивает формирование сжимающих тангенциальных остаточных напряжений в трубах. При этом абсолютная величина сжимающих тангенциальных остаточных напряжений при охлаждении труб в воде больше, чем при охлаждении на воздухе.

Режим, позволяющий получить сжимающие тангенциальные остаточные напряжения в стенке труб, обеспечивающий балл зерна не ниже 8 и стойкость против МКК, и который можно рекомендовать для промышленного использования, следующий:

- плотность тока – 12...18 А/мм²;
- температура нагрева – 1000-1050 °С;
- время нагрева – 30...40 секунд;
- натяжение – $S \cdot \sigma_{ск}$, где S – коэффициент, определяющий требуемый режим растяжения трубы, $\sigma_{ск}$ – сопротивление деформации при максимальной температуре нагрева t_k ;
- охлаждение наружное на воздухе либо в воде.

Наиболее значимым параметром режима является тип охлаждения. Наружное охлаждение на воздухе и в воде обеспечивает сжимающие напряжения в поверхностных слоях стенки трубы. Это обусловлено тем, что при охлаждении поверхностные слои начинают сжиматься, а сила натяжения препятствует этому. В результате после полного охлаждения на поверхности трубы генерируются сжимающие остаточные напряжения. Внутреннее охлаждение водой, напротив, обеспечивает формирование растягивающих остаточных напряжений на наружной по-

верхности трубы и сжимающих на внутренней. Наличие или отсутствие тока в стенке трубы во время процесса охлаждения практически не повлияло на качество труб, поэтому можно сделать вывод, что при охлаждении труб следует размыкать электрическую цепь установки.

Результаты апробации использованы при разработке конструкции промышленной установки правки труб растяжением с одновременным нагревом.

Третья глава целиком посвящена постановке задачи проектирования и описанию предлагаемой конструкции промышленной установки правки труб растяжением с одновременным нагревом.

Неконтролируемое при охлаждении натяжение порождает случайное распределение по сечению остаточных напряжений трудно прогнозируемого уровня. Необходимо разработать такую установку правки труб растяжением с одновременным нагревом, позволяющей осуществлять обработку труб при строго заданной программе изменения коэффициента натяжения. На рисунке 11 показаны продольные вертикальный и горизонтальный разрезы В-В и А-А установки правки труб растяжением с одновременным нагревом. В третьей главе также описан принцип работы установки.

На установке предложенной конструкции можно проводить правку труб растяжением с одновременным нагревом, при этом натяжение в процессе нагрева и охлаждения можно регулировать в зависимости от текущей температуры труб. Это позволяет получать прямолинейные трубы с низким уровнем растягивающих или сжимающими остаточными напряжениями, а также упростить технологический процесс изготовления труб за счет исключения операции их дополнительной правки на валковых станах, снижающей коррозионную стойкость труб.

Обработка труб на установке предложенной конструкции позволяет получить сжимающие остаточные напряжения в стенке труб, что в итоге повышает их стойкость против коррозионного растрескивания.

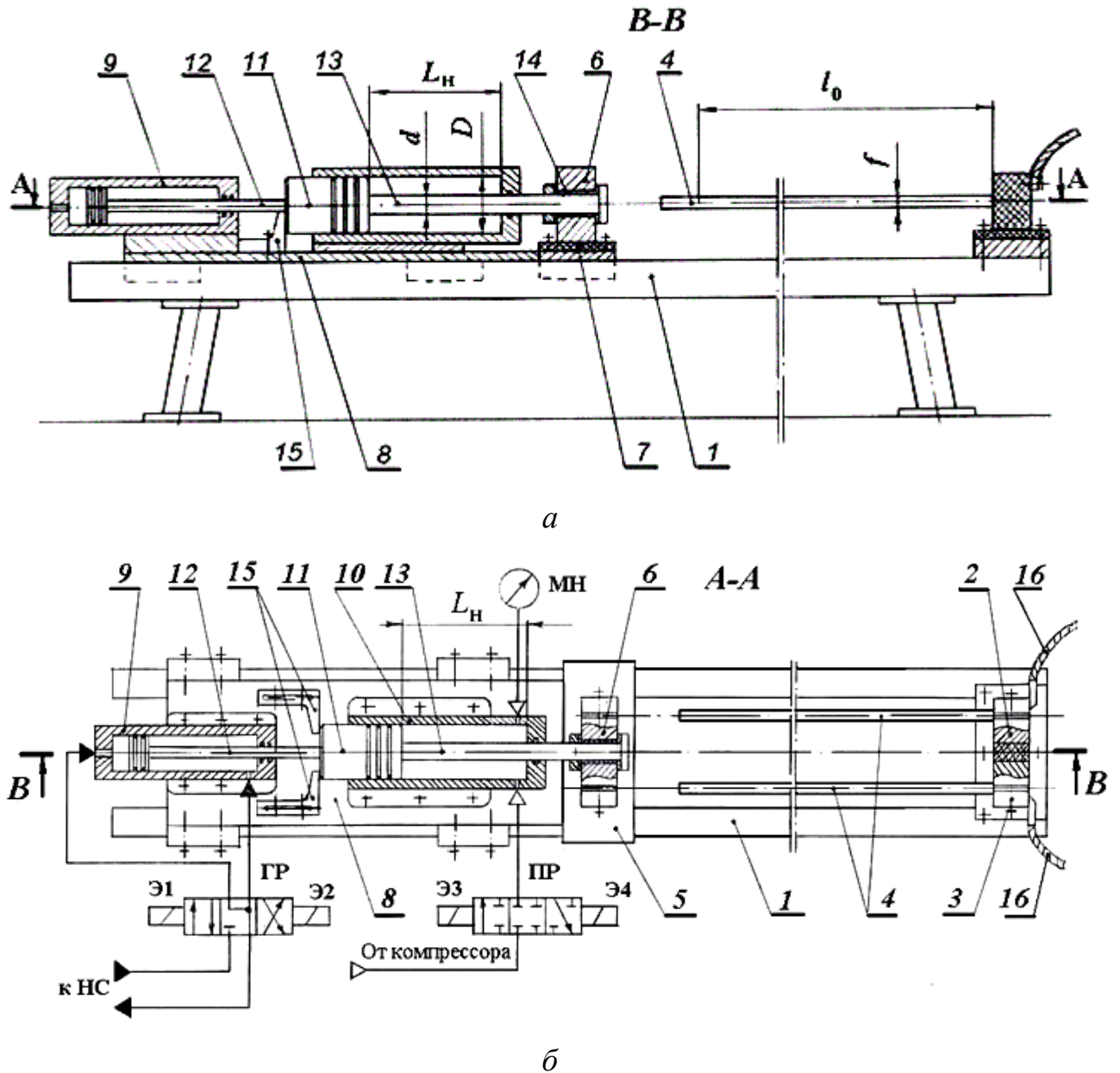


Рисунок 11 – Конструктивная схема установки: *а* – продольный вертикальный разрез В-В установки; *б* – продольный горизонтальный разрез А-А установки в исходном состоянии: 1 – станина; 2 – неподвижные контакты, 3 – прижимы; 4 – труба; 5 – суппорт; 6 – подвижный контакт; 7 – изоляционная прокладка; 8 – платформа; 9 – поршневой гидроцилиндр; 10 – плунжерный пневмоцилиндр; 11 – плунжер; 12 – шток гидроцилиндра, 13 – шток пневмоцилиндра; 14 – фланцевая втулка; 15 – упоры, 16 – клеммы вторичной обмотки
 ПР – пневмораспределитель; ГР – гидрораспределитель;
 Э1, Э2, Э3 и Э4 – электромагниты

Четвертая глава посвящена вопросам, связанным с методами определения остаточных напряжений в трубах. Одним из основополагающих вопросов в области остаточных напряжений является вопрос, связанный с методами точного и достоверного их измерения. В первой главе диссертационной работы были рассмотрены методы измерения остаточных напряжений в металлопродукции. Ряд методик по расчету полей остаточных напряжений основанных на методе «расчленения» нашел широкое применение, однако все методики имеют свои преимущества и недостатки. Показаны недостатки метода разрезных колец.

Известен метод расчета распределения остаточных напряжений по стенке трубы: из решения осесимметричной задачи теории упругости для остаточных напряжений в трубах получены формулы расчета радиальных σ_{rr} , тангенциальных $\sigma_{\varphi\varphi}$ и осевых σ_{zz} остаточных напряжений:

$$\sigma_{rr} = -a_0(R_1 - r)(r - R_2); \quad (1)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = a_0[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]; \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = a_0 \mu [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)], \quad (3)$$

где R_1 и R_2 – соответственно наружный и внутренний радиусы сечения трубы; r – радиальная координата; $r \in [R_1, R_2]$; μ – коэффициент Пуассона материала трубы.

Параметр a_0 зависит от технологических условий изготовления трубных изделий и может быть определен из формулы (2) для экспериментально найденного тангенциального остаточного напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}^*$ на внешней поверхности трубы, то есть при $r = R_1$.

$$a_0 = \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^*}{R_1^2(1 - \bar{R})}, \quad (4)$$

где $\bar{R} = R_2/R_1$ – параметр, характеризующий относительную толщину стенки трубы.

После подстановки значения a_0 в формулы σ_{ii} можно рассчитать компоненты тензора напряжений в каждой точке стенки трубы:

$$\sigma_{rr} = -\frac{\sigma_{\varphi\varphi}^*(R_1 - r)(r - R_2)}{R_1^2(1 - \bar{R})}; \quad (5)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^* [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2(1 - \bar{R})}; \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^* \mu [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2(1 - \bar{R})}. \quad (7)$$

В существующей методике основной проблемой следует считать определение поверхностного тангенциального остаточного напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}^*$ методом разрезных колец. По результатам замера деформации продольно разрезанного кольца, вырезанного из трубы, нельзя с высокой точностью судить о величине напряжения в поверхностных слоях, поскольку деформация кольца является результатом уравнивания всей эпюры тангенциальных остаточных напряжений.

В настоящей работе проведено преобразование описанного метода с целью повышения точности расчетов. Учитывая отмеченную неопределенность при экспериментальном нахождении $\sigma_{\varphi\varphi}^*$ методом разрезных колец, система уравнений σ_{ii} была преобразована для обеспечения возможности использования в качестве исходной экспериментальной информации значения продольного остаточного напряжения σ_{zz}^* на наружной поверхности трубы или продольного остаточного напряжения σ_{zz}^{**} на внутренней поверхности. Для определения осевого напряжения σ_{zz}^* и σ_{zz}^{**} может быть применен метод стравливания, хорошо зарекомендовавший себя при замерах остаточных напряжений в сечении прутков и проволоки:

$$\sigma_{zz}^* = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1'^2 - R_2'^2}{R_1^2 - R_1'^2}, \quad (8)$$

где R_1' – наружный радиус трубы после стравливания наружного слоя толщиной $R_1 - R_1'$;

$$\sigma_{zz}^{**} = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1^2 - R_2'^2}{R_2'^2 - R_2^2}, \quad (9)$$

где R_2' – внутренний радиус трубы после стравливания внутреннего слоя толщиной $R_2' - R_2$.

Тогда компоненты тензора напряжений будут определяться из следующих уравнений:

для случая стравливания наружного слоя, $R_1' < R_1$:

$$\sigma_{rr} = -\frac{\sigma_{zz}^* (R_1 - r)(r - R_2)}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_{zz}^* [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})}; \quad (11)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma_{zz}^* [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2 (1 - \bar{R})}, \quad (12)$$

для случая сжатия внутреннего слоя, $R'_2 > R_2$:

$$\sigma_{rr} = -\frac{\sigma_{zz}^{**} (R_1 - r)(r - R_2)}{\mu R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}; \quad (13)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_{zz}^{**} [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{\mu R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}; \quad (14)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma_{zz}^{**} [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}. \quad (15)$$

Когда напряжения в наружных и внутренних слоях стенки трубы противоположны по знаку, распределения $\sigma_{zz}(r)$ и $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$, рассчитанные по формулам $\sigma_{ii}(r)$, близки к линейным. В тех же случаях, когда на обеих поверхностях возникают однозначные продольные напряжения распределения напряжений $\sigma_{ii}(r)$ по толщине стенки трубы могут быть получены только в рамках принятых гипотез при удовлетворении условиям равновесия. В настоящей работе использована гипотеза параболического распределения остаточных напряжений по толщине стенки трубы, которая иллюстрируется схемой на рисунке 12.

Поскольку радиальные остаточные напряжения в стенке теплообменных труб не велики и не вносят значительный вклад в процесс коррозионного растрескивания, ниже будут рассмотрены главным образом осевые и тангенциальные остаточные напряжения, действующие в стенке труб.

Напряжения σ_{zz}^* и σ_{zz}^{**} определяются описанным выше способом, а $\sigma_{\varphi\varphi}^*$ и $\sigma_{\varphi\varphi}^{**}$ находятся из уравнений $\sigma_{\varphi\varphi}(\sigma_{zz}^*)$ и $\sigma_{\varphi\varphi}(\sigma_{zz}^{**})$ при $r = R_1$ и $r = R_2$ соответственно, то есть

$$\sigma_{\varphi\varphi}^* = \sigma_{zz}^* / \mu \text{ и } \sigma_{\varphi\varphi}^{**} = \sigma_{zz}^{**} / \mu. \quad (16)$$

Распределения напряжений по толщине стенки трубы представлены уравнениями

$$\sigma_{zz} = a_z r^2 - b_z r - c_z, \quad (17)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = a_\varphi r^2 - b_\varphi r - c_\varphi, \quad (18)$$

коэффициенты аппроксимации которых находятся из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ii}^* &= a_i R_1^2 + b_i R_1 + c_i \\ \sigma_{ii}^{**} &= a_i R_2^2 + b_i R_2 + c_i \\ \sigma_{0i} &= a_i r_{0i}^2 + b_i r_{0i} + c_i \end{aligned} \right\}, \text{ где } i = z \text{ или } \varphi. \quad (19)$$

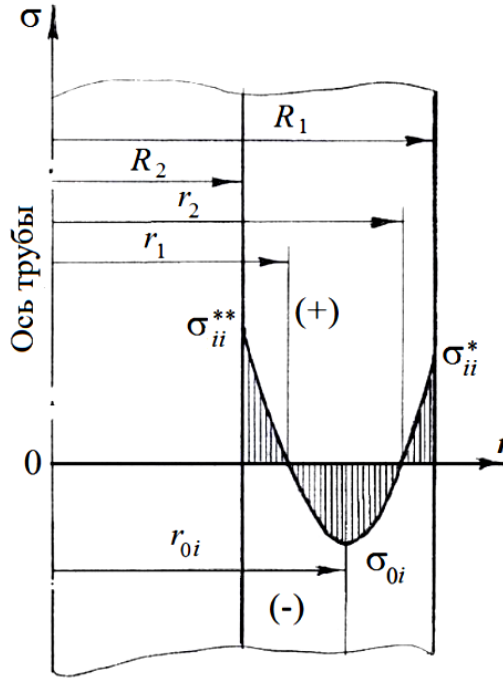


Рисунок 12 — Расчетная схема распределения остаточных напряжений по толщине стенки трубы при однозначных поверхностных напряжениях

Координаты r_{0i} , σ_{0i} определяют положение вершины параболы и определяются при расчете эпюр $\sigma_{zz}(r)$ и $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$ из условий равновесия остаточных напряжений в объеме трубы. Коэффициенты аппроксимации с точностью до неизвестных координат вершины параболы находятся из выражений:

$$a_i = k_{i1} - b_i k_{i3}; \quad b_i = (k_{i1} - k_{i2}) / (k_{i3} - k_{i4}); \quad c_i = \sigma_{ii}^{**} - a_i R_i^2 - b_i R_i; \quad (20)$$

где

$$k_{i1} = \frac{\sigma_{ii}^{**} - \sigma_{ii}^*}{R_2^2 - R_1^2}; \quad k_{i2} = \frac{\sigma_{0i} - \sigma_{ii}^*}{r_{0i}^2 - R_1^2}; \quad k_{i3} = \frac{R_2 - R_1}{R_2^2 - R_1^2}; \quad k_{i4} = \frac{r_{0i} - R_1}{r_{0i}^2 - R_1^2}. \quad (21)$$

На значения координаты r_{0i} накладывается условие $d\sigma_{ii}/dr=0$, из которого следует:

$$a_{0i} = -b_i/2a_i. \quad (22)$$

Уравнение равновесия напряжений σ_{zz} в поперечном сечении трубы, составленное в соответствии с обозначениями на рисунке 12, имеет вид:

$$\int_{R_2}^{r_1} \sigma_{zz}(r) r dr + \int_{r_2}^{R_1} \sigma_{zz}(r) r dr + \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{zz}(r) r dr = 0. \quad (23)$$

После интегрирования уравнение равновесия, представленное в форме

$$\frac{a_z}{4} (R_1^4 - R_2^4) + \frac{b_z}{3} (R_1^3 - R_2^3) + \frac{c_z}{2} (R_1^2 - R_2^2) = 0, \quad (24)$$

позволяет найти σ_{0z} последовательными приближениями по r_{0z} . При этом в качестве первого приближения принято значение

$$r'_{0z} = \frac{R_2 + R_1 \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\sigma_{zz}^*}}{1 + \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\sigma_{zz}^*}}. \quad (25)$$

Кроме того в четвертой главе описана апробация предложенной методики в лабораторных условиях на опытной установке (рисунок 13), и приведены результаты измерений остаточных напряжений в трубах 16x1,5 из стали 08X18H10T в состоянии поставки.

Главной особенностью установки, отличающей ее от аналогов, является возможность вращения трубы во время травления, что обеспечивает равномерное травление поверхностного слоя металла и, следовательно, большую точность при расчете остаточных напряжений.

Измеренный трубный образец 5 с предварительно заглушенными торцами и закрепленным подшипником 3 закреплялся в захватах 4, которые установлены на гибких валах 6. После этого на подшипник и стальную ленту подключались контакты, и вся подвижная конструкция опускалась в ванну 1, заполненную электролитом. Затем включался привод вращения, после чего замыкалась электрическая цепь, и начинался процесс травления. После снятия слоя нужной толщины измерялись диаметр образца и его длина.

В случае травли слоя металла с внутренней стенки трубы измеренный образец 5 предварительно обматывался изоляцией для того чтобы не травми-

лась наружная поверхность стенки трубы. Далее на образце закреплялся подшипник 3 и изолировались торцы, после чего ход эксперимента продолжался, как и для случая травления наружной поверхности стеки трубы. Дальнейший расчет распределения остаточных напряжений велся по методике, описанной выше. Распределения остаточных напряжений, полученные по указанной методике для теплообменных труб в состоянии поставки, показаны на рисунке 14.

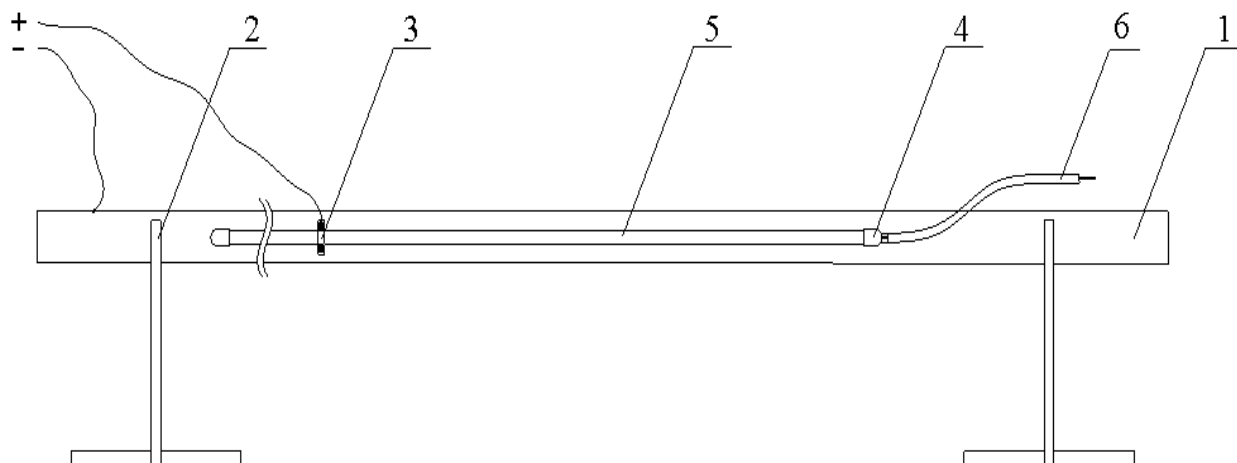


Рисунок 13 — Лабораторная установка для определения продольных остаточных напряжений в трубах: 1 – ванна, 2 – опоры, 3 – подшипник, 4 – подвижные захваты, 5 – образец, 6 – привод вращения

Предложенная методика позволяет простыми аппаратными средствами и несложной расчетной процедурой определять распределение остаточных напряжений в стенке трубы с высокой точностью. Снятие достаточно тонких поверхностных слоев металла и замер приращения длины образцов не представляет больших технических трудностей, а сохранение осевой симметрии обрабатываемых образцов предотвращает дополнительные ошибки, связанные с нарушением геометрии образцов. Кроме того, предложенная методика дает возможность не ограничивать длину образцов, что избавляет от необходимости учитывать концевые эффекты искажения истинных эпюр напряжений и упрощает технику точного замера относительной продольной деформации трубы после снятия поверхностных слоев как снаружи, так и изнутри.

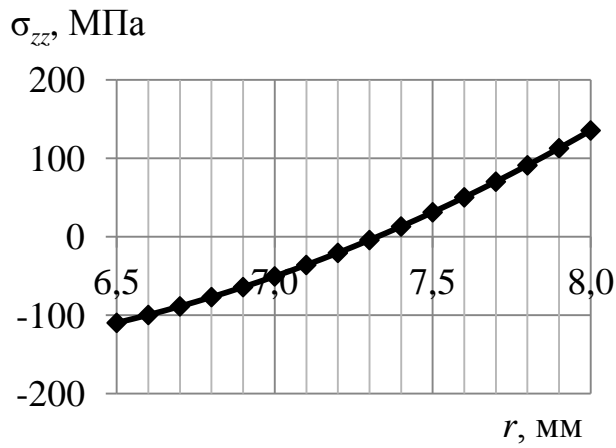
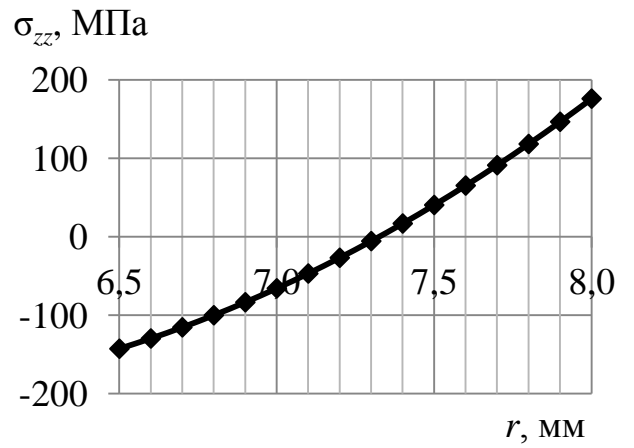
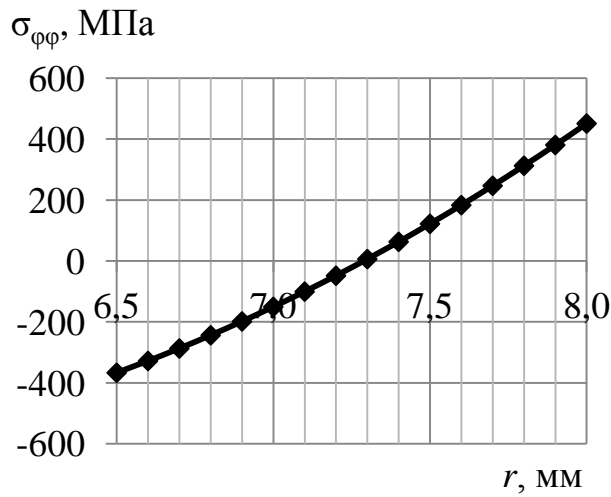
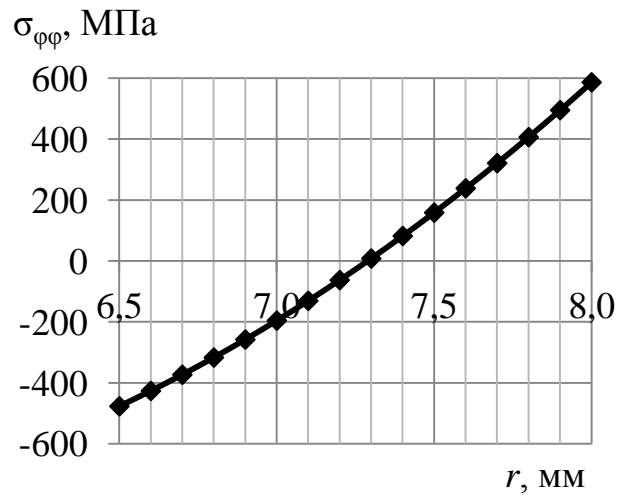
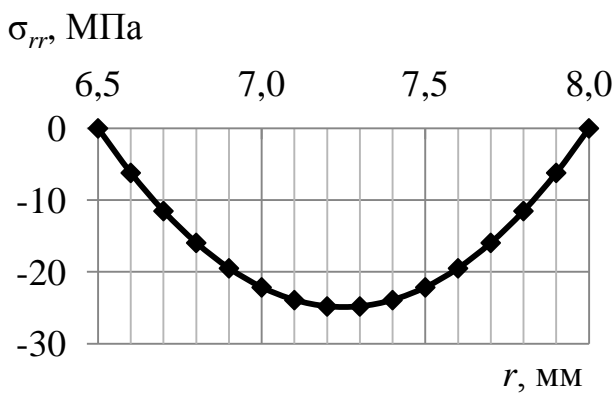
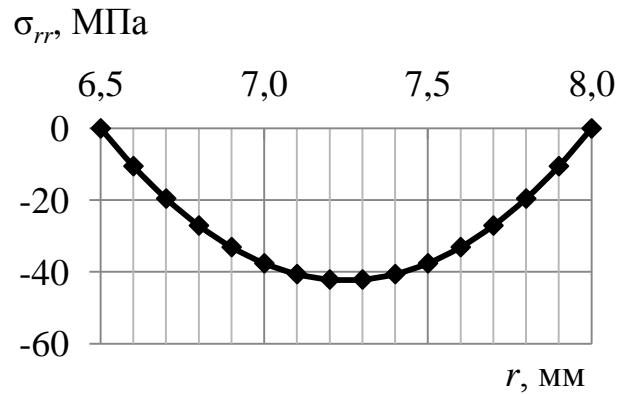
*a**z**b**d**v**e*

Рисунок 14 – Распределение остаточных напряжений по стенке труб:

a, б, в – после стравливания наружного слоя;

г, д, е – после стравливания внутреннего слоя

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Одним из основных факторов, определяющих ресурс работы парогенератора АЭС, является коррозионное растрескивание теплообменных труб в процессе эксплуатации. Коррозионное растрескивание теплообменных труб развивается под действием растягивающих рабочих и технологических остаточных напряжений в трубах. Поэтому снижение растягивающих технологических остаточных напряжений в ТОТ является актуальной проблемой.

2. Применяемые как зарубежом, так и на отечественных заводах технологии производства теплообменных труб, несмотря на существенные отличия, предусматривают одинаковую финишную обработку труб: термообработку и последующую правку на валковых станах. В процессе правки знакопеременным изгибом выделяется мартенсит деформации, и образуются растягивающие остаточные напряжения, под действием которых развивается коррозионное растрескивание ТОТ в процессе эксплуатации.

3. Разработка технологии финишной обработки теплообменных труб, включающей операцию валковой правки и, тем самым, образование растягивающих остаточных напряжений в трубах является актуальной проблемой.

4. Разработан и опробован в производственных условиях способ финишной правки труб растяжением с одновременным нагревом, с целью уменьшения в них остаточных напряжений.

5. Способ обеспечивает получение механических свойств, величины зерна металла труб, микроструктуры и стойкости против МКК в соответствии с требованиями ТУ 14-ЗР-197-2001. При этом кривизна и растягивающие остаточные напряжения в трубах на порядок меньше, чем в трубах после печного нагрева.

6. Разработана конструкция промышленной установки правки труб растяжением с одновременным нагревом. Установка позволяет проводить правку труб растяжением с одновременным нагревом, при этом натяжение в процессе нагрева и охлаждения можно регулировать в зависимости от текущей температуры.

7. Разработано техническое задание на проектирование промышленной установки правки труб растяжением с одновременным нагревом.

8. Разработана и опробована экспериментально-аналитическая методика, позволяющая простыми аппаратными методами и не сложными расчетными операциями определять остаточные напряжения в трубах.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

Статьи, в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Буркин С.П., Шимов Г.В. Экспресс анализ остаточных напряжений в трубах // Сталь. 2012. №5. С. 72-75.

2. Шимов Г.В., Буркин С.П., Серебряков Ан. В., Серебряков Ал. В., Исхаков Р.Ф. Способ термической обработки и правки труб для парогенераторов АЭС // Черные металлы. 2013. №11. С. 31-37.

В сборниках трудов научных конференций:

3. Буркин С.П., Шимов Г.В., Серебряков Ал. В., Серебряков Ан. В. Электроконтактный нагрев труб с растяжением. Сборник трудов конференции «Неделя металлов в Москве», 13-16 ноября 2012 г., Москва: ВНИИМЕТМАШ, 2013, С. 552-562.

4. Шимов Г.В. Исследование поля остаточных напряжений в трубах из коррозионностойких нержавеющей сталей. Материалы XIV международной научной конференции «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering». Польша, Ченстохова, 2013. Т. 1. С. 437-440.

5. Буркин С.П., Шимов Г.В., Серебряков Ал. В., Серебряков Ан. В. Электроконтактный нагрев труб с растяжением. Сборник научных трудов VI международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 581-587.

6. Шимов Г.В., Репшис С.Э. Рациональная методика анализа уровня и распределения остаточных напряжений в стенке трубы. Сборник научных трудов XII-ой международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых. 14-18 ноября 2011 г., Екатеринбург: УрФУ, С. 161-163.